

УДК 546.161,541.127/4

## ФТОРИДНЫЙ МЕТОД ПЕРЕРАБОТКИ РУТИЛОВОГО КОНЦЕНТРАТА

В.А. Карелин, О.В. Каменева

Северская государственная технологическая академия

E-mail: vladimir@seversk.tomsnet.ru

*Выполнено термодинамическое исследование процесса фторирования рутилового концентрата элементарным фтором с использованием компьютерной программы "ASTRA". Изучены кинетические особенности процесса и проведена их математическая обработка. Обсуждены условия проведения процесса в промышленном оборудовании.*

В настоящее время существуют две схемы переработки титаносодержащих концентратов: сернокислотная и хлоридная. При использовании сернокислотной технологии происходит существенное загрязнение окружающей среды, а получаемый диоксид титана имеет высокую стоимость. Ежегодно зарубежными фирмами в окружающую среду сбрасываются сотни тысяч тонн сульфатсодержащих отходов (в виде  $\text{CaSO}_4$ ). Хлоридный способ производства диоксида титана считается более благоприятным в экологическом отношении. В тоже время и в этом случае, образуются огромные количества газовых, жидких и твердых хлоридных производственных сбросов, а общее извлечение титана в очищенный хлорид не превышает 89 мас. %. При мировом производстве пигментного диоксида титана 2750 тыс. т/год будет образовываться 1467 тыс. т/год или 4890 т/сут вредных хлоридных производственных твердых отходов (при условии перевода всех заводов на хлоридную технологию) [1, 2].

Все это является предпосылкой для разработки и создания более прогрессивной и перспективной фторидной технологии по переработке титаносодержащих концентратов. Одним из наиболее распространенных титаносодержащих концентратов, применяемых в технологии, является рутиловый. В настоящей работе в качестве сырьевого источника предлагается использовать рутиловый концентрат Тарского месторождения (Омская область), состав которого приведен в табл. 1 [3].

**Таблица 1.** Химический состав рутилового концентрата Тарского месторождения (Омская область)

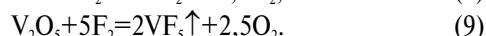
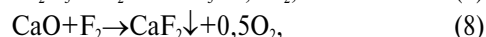
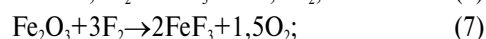
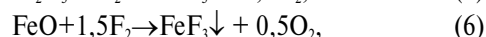
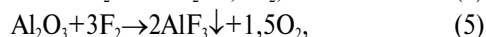
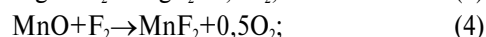
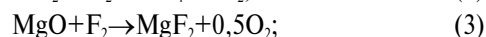
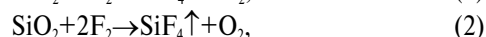
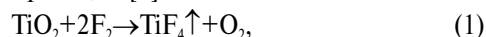
Вещество	Содержание, мас. %
$\text{TiO}_2$	93,2
$\text{SiO}_2$	1,8
$\text{FeO}$	1,5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,2
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,0
$\text{MnO}$	0,6
$\text{CaO}$	0,4
$\text{MgO}$	0,2
$\text{V}_2\text{O}_5$	0,1

Разрабатываемая нами фторидная технология получения титана в виде высокочистого металлического порошка включает следующие стадии: фторирование рутиловых концентратов, выделение образовавшегося  $\text{TiF}_4$  из газового потока и электролитическое восстановление титана во фто-

ридном расплаве. Основное преимущество этой технологии состоит в том, что элементарный фтор, образующийся в процессе получения титана, вновь возвращается в начало процесса на фторирование рутила. Фториды нелетучих примесей, входящих в состав рутилового концентрата, используют в металлургической промышленности в качестве раскислителей стали. Летучие фториды, содержание которых не превышает ~2 % от основного компонента, подлежат переработке. Поэтому оценочное количество образующихся по предлагаемой технологии отходов будет значительно меньшим, чем по хлоридной и сульфатной технологиям.

В связи с этим, в первую очередь были изучены физико-химические аспекты процесса фторирования диоксида титана и соединений, входящих в состав рутилового концентрата, элементарным фтором ( $\text{F}_2$ ).

Для термодинамического описания процесса фторирования диоксида титана выбраны следующие реакции [3]:



В результате фторирования образуются: газовая фаза, содержащая  $\text{TiF}_4$ ,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{VF}_5$ , твердый остаток –  $\text{FeF}_3$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{MnF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$  и непрореагировавшие оксиды.

Зависимость изменения логарифма константы равновесия этих реакций от температуры  $\lg K_p = f(T)$  представлена на рис. 1.

Термодинамическое исследование процесса фторирования  $\text{TiO}_2$  элементарным фтором показывает, что образование тетрафторида титана ( $\text{TiF}_4$ ) протекает во всем рассматриваемом диапазоне температур (от 298 до 1800 К). Фторирование оксидов примесных элементов также происходит во всем рассматриваемом температурном диапазоне.

Из рис. 1 видно, что рассматриваемые процессы фторирования с термодинамической точки зрения не имеют ограничений, являются необратимыми и

протекают с образованием целевых продуктов в виде фторидов.

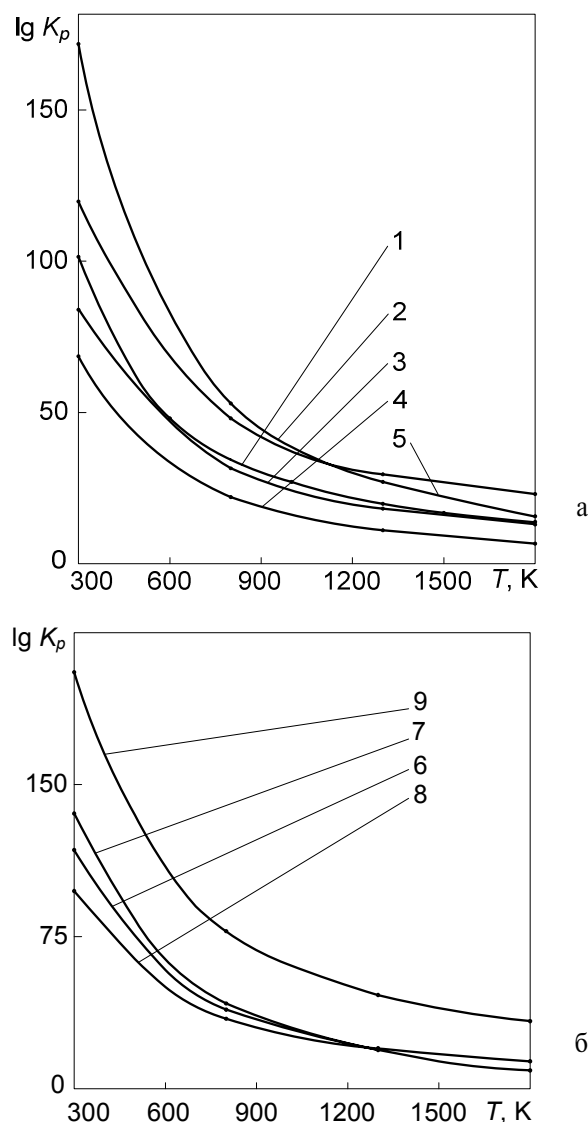


Рис. 1. Зависимость изменения  $\lg K_p$  от температуры реакций фторирования компонентов рутилового концентрата

Выполнены также исследования равновесного состава изолированной термодинамической системы с использованием пакета программ термодинамических расчетов «ASTRA», разработанных в MBTU им. Н.Э. Баумана [4]. Эти исследования проводили для следующего состава рутилового концентрата, мас. %: 48,43  $\text{TiO}_2$ ; 0,92  $\text{FeO}$ ; 1,03  $\text{SiO}_2$ ; 0,56  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 0,15  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 0,12  $\text{CaO}$ ; 0,06  $\text{V}_2\text{O}_5$ , что составляет 51,27 % от исходной смеси. Остальное – стехиометрически необходимое для фторирования количество фтора и его избыток.

При проведении исследований в указанном температурном диапазоне возможно существование следующих продуктов реакций:  $\text{O}_2$ ,  $\text{CaF}_{2(\text{тв})}$ ,  $\text{TiF}_{4(\text{тв})}$ ,  $\text{TiO}_{2(\text{тв})}$ ,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{CrF}_6$ ,  $\text{TiF}_4$ ,  $\text{SiOF}_2$ ,  $\text{AlF}_{3(\text{тв})}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_{5(\text{тв})}$ ,  $\text{FeF}_{3(\text{тв})}$ ,  $\text{FeF}_3$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{V}_4\text{O}_{10}$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{F}_2\text{O}$ ,  $\text{FO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{F}_6$ ,  $\text{Al}_2\text{F}_6$ ,  $\text{TiF}_3$ ,  $\text{FeF}_2$ ,

$\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В связи с большим количеством образующихся в данной системе химических соединений, при анализе были отброшены вещества, концентрация которых в исследуемой области температур была менее 0,0001 моль/кг, что не превышает 0,01 % от концентрации целевых продуктов  $\text{TiF}_4$  и  $\text{O}_2$ .

В результате выполненного исследования установлено, что основными газообразными продуктами процесса фторирования являются  $\text{TiF}_4$  и  $\text{O}_2$ .

На рис. 2 представлена зависимость изменения массовой концентрации  $\text{TiF}_4$  ( $C$ , мас. %) в продуктах реакции от температуры ( $T$ , K) процесса фторирования.

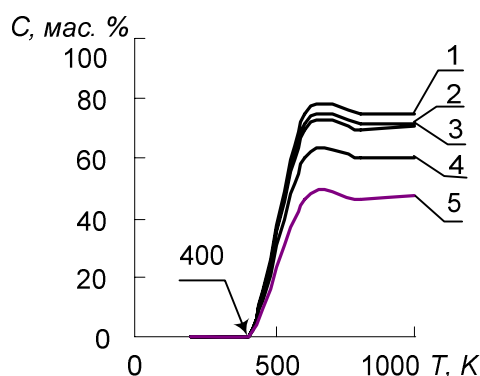


Рис. 2. Зависимость содержания  $\text{TiF}_4$  от температуры для различных соотношений реагентов: 1) стехиометрия по  $\text{F}_2$ ; 2) избыток 10 % по  $\text{F}_2$ ; 3) избыток 50 % по  $\text{F}_2$ ; 4) недостаток 10 % по  $\text{F}_2$ ; 5) недостаток 50 % по  $\text{F}_2$

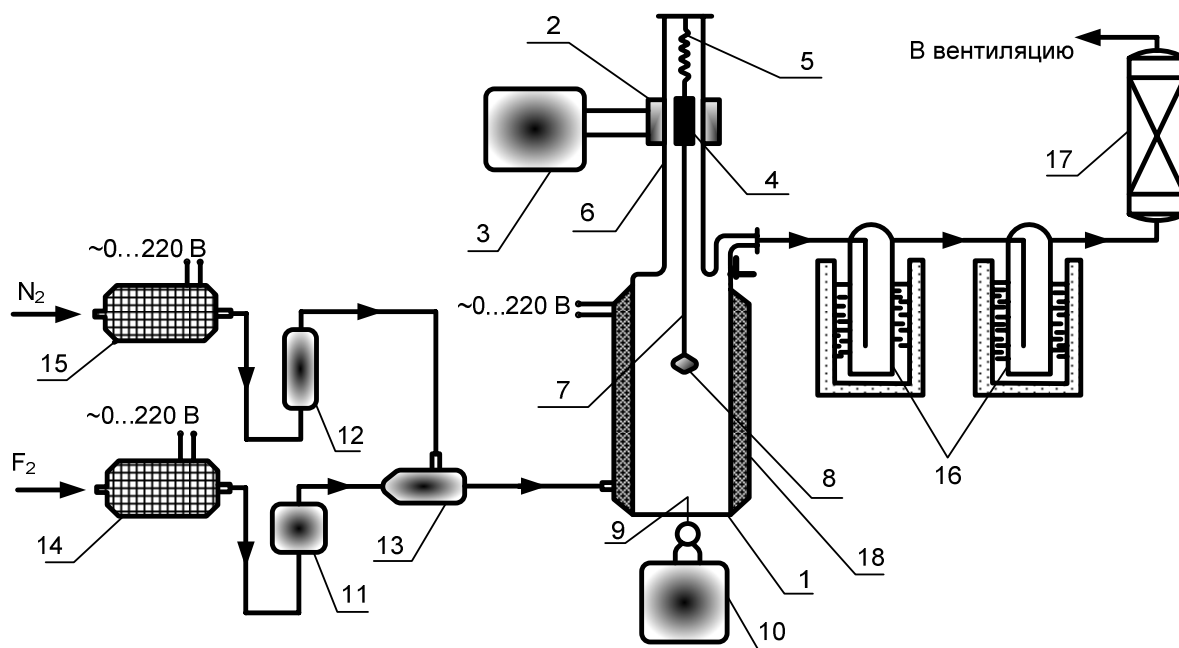
Из рис. 2 видно, что более высокое содержание целевого продукта ( $\text{TiF}_4$ ) наблюдается при стехиометрическом соотношении фаз, однако в исследованиях показано, что в этом случае в системе будет находиться некоторое количество непрореагировавшего  $\text{TiO}_2$ . В связи с этим оптимальные условия проведения процесса фторирования – 10 %-ный избыток  $\text{F}_2$ .

В табл. 2 приведен равновесный состав продуктов процесса фторирования рутилового концентрата при 10 %-ном избытке фтора.

Таблица 2. Содержание продуктов реакции фторирования, мас. % (при содержании исходных веществ 48,43 мас. %  $\text{TiO}_2$ , 48,75 мас. %  $\text{F}_2$ , остальное примеси)  $P=0,1$  МПа. Избыток фтора 10 % от стехиометрии\*

$T$ , K	$\text{TiF}_{4(\text{тв})}$	$\text{TiF}_{4(\text{г})}$	$\text{V}_2\text{O}_{5(\text{тв})}$	$\text{F}_{2(\text{г})}$
473	72	0	$5,34 \cdot 10^{-2}$	4,4
673	72	$4,59 \cdot 10^{-2}$	$5,34 \cdot 10^{-2}$	4,4
873	0	71,6	$5,34 \cdot 10^{-2}$	4,4
1073	0	71,6	$5,32 \cdot 10^{-2}$	4,3
1273	0	71,6	$5,29 \cdot 10^{-2}$	3,7

\*Содержание  $\text{O}_{2(\text{г})}$ ,  $\text{CaF}_{2(\text{тв})}$ ,  $\text{SiF}_{4(\text{г})}$ ,  $\text{AlF}_{3(\text{тв})}$  и  $\text{FeF}_{3(\text{тв})}$  в продуктах реакции практически не изменяется и составляет 20,  $1,3 \cdot 10^{-1}$ , 1,7,  $8,8 \cdot 10^{-1}$  и 1,38 мас. % соответственно



**Рис 3.** Схема экспериментальной установки фторирования основного компонента рутилового концентрата –  $\text{TiO}_2$ : 1) реактор фторирования; 2) индукционная катушка; 3) регистрирующий прибор; 4) электромагнитная катушка; 5) пружина из Мо; 6) измерительное устройство; 7) молибденовая нить; 8) чашечка из никелевой фольги; 9, 10) система регулирования и регистрации температуры; 11, 12) система регулирования расхода газа; 13) узел подачи фтора и аргона; 14, 15) нагреватели фтора и азота; 16) узел конденсации летучих фторидов; 17) линия очистки отходящих газов; 18) обогреватель реактора 1

Из полученных результатов следует, что заметное образование газообразного тетрафорида титана начинается при температуре выше 400 К и его количество доминирует во всем температурном диапазоне. При фторировании образуются также нелетучие фториды –  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{AlF}_3$  и  $\text{FeF}_3$ .

Основной компонент рутилового концентрата –  $\text{TiO}_2$  фторируется образованием летучего фторида –  $\text{TiF}_4$ .

Для подтверждения термодинамических расчетов и изучения особенностей процесса фторирования основного компонента рутилового концентрата –  $\text{TiO}_2$  выполнены кинетические исследования на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 3.

Основной элемент этой установки – вертикальный реактор фторирования – 1, изготовленный из коррозионно-стойкого во фторидных средах сплава ЭИ-943. Для запуска процесса фторирования предназначен электрообогреватель – 18.

В крышку реактора впаяна латунная трубка, внутри которой находится измерительный элемент – отоженная молибденовая пружина, одним концом закрепленная на заглушке, другим – соединенная со стальным плунжером индукционной катушки – 2 измерительного и регистрирующего прибора – 3. К нижнему концу плунжера на подвесе из молибденовой нити прикреплена чашечка из никелевой фольги – 8. Перед реактором – 1 расположен узел подачи фтора и азота – 13. Для регулирования и регистрации температуры предназначен

датчик – 9 и система – 10. Расходы газообразных фтора и азота регулируют системами – 11, 12. На выходе из реактора расположен узел конденсации летучих фторидов – 16. Санитарную очистку отходящих газов от фторсодержащих примесей проводят на линии – 17.

Для уменьшения влияния тепла реакции на изотермические условия в схеме опытной установки предусмотрено разбавление фтора азотом. Предварительный подогрев реакционной газовой смеси осуществляют в змеевике, расположенном на наружной поверхности реактора. Использование массивного металлического реактора и примененного метода подвода реакционной газовой смеси позволили свести до минимума температурный градиент: навеска – реакционная газовая смесь.

Кинетику процесса фторирования  $\text{TiO}_2$  элементарным фтором изучали на порошках с гранулометрическим составом от  $2 \cdot 10^{-6}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$  м с площадью удельной поверхности  $3,5 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Исследования выполняли на образцах  $\text{TiO}_2$  массой 280 мг с толщиной слоя навески до 4 мм в температурном диапазоне 580...830 °С. В ходе проведения процесса фторирования при контролируемых температуре и парциальном давлении фтора непрерывно фиксировали массу образца. Фторирование проводили техническим фтором, который очищали от HF сорбцией на таблетированном NaF при 370...380 К. Для отвода выделяющегося при фторировании тепла и создания изотермических условий фтор разбавляли инертным газом – азотом.

Эта реакция, протекающая на поверхности соприкосновения твердой и газообразной фаз, складывается из следующих основных стадий:

1. транспорта реагирующего газа к поверхности твердого;
2. сорбции газа на поверхности твердого;
3. химической реакции сорбированного газа с твердым;
4. десорбции газообразного  $TiF_4$  с поверхности твердого;
5. транспорта десорбированного  $TiF_4$ .

Скорость взаимодействия  $TiO_2$  со фтором определяется наиболее медленным из этих процессов. Процессы 1 и 5 – диффузионного характера; для очень тонкого слоя материала роль их сравнительно невелика, поэтому скорость фторирования в основном определяется процессами 2, 3 и 4. В свою очередь, скорость всех этих процессов обуславливается температурой; скорость процесса 2 зависит как от величины поверхности твердого вещества, так и от парциального давления фтора в системе. Таким образом, скорость взаимодействия  $TiO_2$  с фтором определяется температурой, парциальным давлением фтора и физико-химическими характеристиками исходного вещества.

Качественными наблюдениями установлено, что при температуре 580 К и ниже процесс фторирования протекает медленно, вероятно, с образованием твердого оксифторида или газообразного тетрафторида титана. Первое соединение образует пленку на поверхности частиц диоксида титана, которая практически останавливает процесс. С заметной скоростью реакция протекает лишь при температуре 630 К, а при 830 К скорость реакции постепенно возрастает, и улетучивание титана в виде тетрафторида заканчивается в течение 12...14 мин.

Кинетические зависимости фторирования диоксида титана фтором имеют S-образную форму, характерную для гетерогенных процессов «газ-твердое» [5]. На зависимости скорости от времени можно выделить три участка: 1 – индукционный период, характеризующийся низкой скоростью и связанный с превращением исходного диоксида титана в промежуточные оксифториды. В течение индукционного периода происходит формирование поверхности раздела фаз, состоящей из промежуточного соединения (оксифторида титана). Атомы фтора диффундируют внутрь исходного твердого реагента, образуя зародыши промежуточных соединений. На стадии 2 – по мере возникновения новых зародышей скорость возрастает, достигая максимального значения, и дальнейший ход кинетических кривых определяется продвижением поверхности раздела фаз. На стадии 3 – сокращение площади поверхности за счет расхода твердого реагента приводит к уменьшению скорости превращения [6].

Зависимости скорости от времени фторирования при 580 К характеризуется большим индукционным периодом. Значительное увеличение

скорости фторирования в диапазоне 780...830 К можно объяснить тем, что реакция переходит в режим горения. Необходимо отметить, что реакция фторирования протекают со значительным выделением тепла, поэтому довольно трудно выдерживать изотермические условия процесса.

Математическая обработка количественных данных по взаимодействию диоксида титана с фтором была проведена по трем уравнениям: Гистлинга, «сокращающейся» сферы и Яндера [3].

Уравнение Гистлинга используется для описания скорости процесса во внешнел диффузионной области:

$$1 - (1 - \alpha)^{2/3} = k\tau,$$

где  $\alpha$  – степень превращения реагирующего вещества,  $k$  – константа скорости,  $\tau$  – время.

Уравнение «сокращающейся» сферы применимо для описания кинетической области:

$$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = k\tau,$$

а для описания скорости реакций, в ходе которых образуются достаточно плотные пленки продуктов, замедляющие поступление газообразного реагента (элементного фтора) к реакционной поверхности реагирования (диффузионная область), используют уравнение Яндера

$$(1 - (1 - \alpha)^{1/3})^2 = k\tau.$$

Применимость представленных выше уравнений для описания механизма фторирования определялась по максимальному коэффициенту корреляции зависимостей  $k = f(\alpha, t)$  для каждого исследуемого формального кинетического уравнения.

На рис. 4–6 приведены соответствующие зависимости (в скобках указаны температуры проведения процесса фторирования).

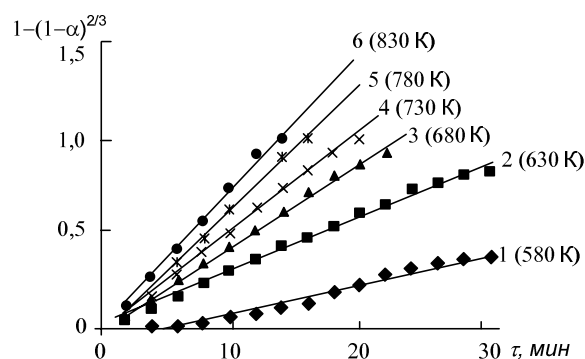


Рис. 4. Зависимость  $1 - (1 - \alpha)^{2/3} = f(\tau)$  для уравнения Гистлинга

Из представленных данных видно, что экспериментальные данные наиболее точно (коэффициент корреляции 0,96...0,99) приближаются к функции, описываемой уравнением Гистлинга. Это уравнение выведено из предположения, что скорость процесса определяется диффузией молекул фторированного реагента и возгоняющихся продуктов фторирования:  $TiF_4$ ,  $SiF_4$ ,  $O_2$  и др.) в пространство между зернами, которое полагается бесконечным [6].

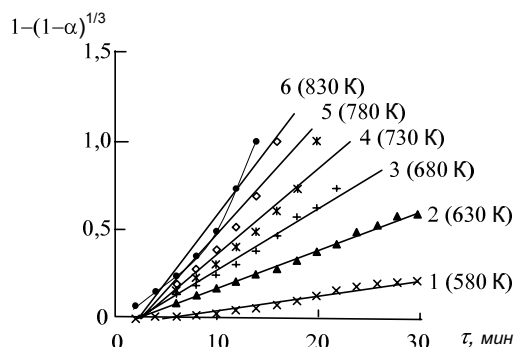


Рис. 5. Зависимость  $1-(1-\alpha)^{1/3}=f(\ln\tau)$  для уравнения «сжимающейся» сферы

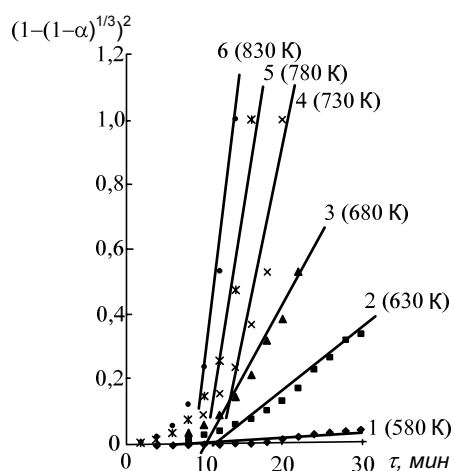


Рис. 6. Зависимость  $(1-(1-\alpha)^{1/3})^2=f(\ln\tau)$  для уравнения Яндера

Влияние температуры на скорость фторирования диоксида титана, рассчитанное по уравнению Гистлинга, приведено на рис. 7.

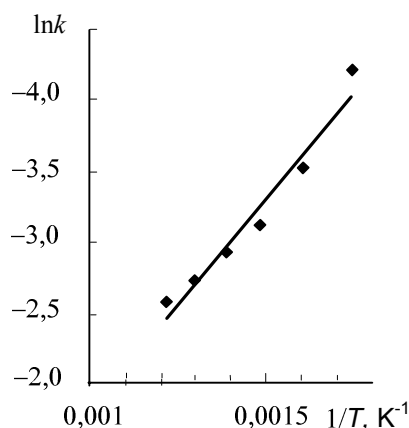


Рис. 7. Зависимость  $\ln k$  от обратного значения абсолютной температуры

Для определения энергии активации процесса ( $E_a$ ) проведена линеаризация зависимости, представленной на рис. 7.

Как видно из этих данных, прямо пропорциональная зависимость наблюдается на протяжении всего температурного диапазона процесса фторирования за исключением начальной и конечной ста-

дий. Отклонение от прямолинейной зависимости в начале процесса обусловлено заполнением системы инертным газом — азотом, который необходим для удаления воздуха из системы; в течение последней стадии процесса фторируется не  $\text{TiO}_2$ , а образовавшийся промежуточный оксифторид титана.

По наклону прямой в аррениусовских координатах определено значение кажущейся энергии активации (24600 Дж/моль) и предэкспоненциальный множитель ( $k_0=3,063 \text{ мин}^{-1}$ ) процесса фторирования диоксида титана элементарным фтором.

Таким образом, кинетическое уравнение фторирования  $\text{TiO}_2$  имеет вид:

$$(1-(1-\alpha)^{1/3})^2=3,063 \cdot e^{\frac{24600 \pm 100}{RT}} \varepsilon.$$

Необходимо отметить, что все описанные выше закономерности относятся к случаю использования большого избытка фтора. На практике обычно используют минимальный избыток фтора. При образовании из  $\text{TiO}_2$  промежуточных фторидов скорость процесса достаточно велика, и фтор можно использовать практически нацело. При получении же из промежуточных фторидов тетрафторида титана можно добиться количественного использования фтора лишь при очень длительном соприкосновении твердой и газовой фаз; это возможно при противоточном процессе, когда свежий фтор подается на обработку частично профторированного продукта, а отходящие газы обрабатывают свежий диоксид титана.

В статических условиях (или при недостаточной интенсивности перемешивания) и при высоких концентрациях фтора может происходить значительное перегревание твердого материала. Так как промежуточный оксифторид титана и примеси, присутствующие в исходном рутиловом концентрате, обладают способностью спекаться, плохое перемешивание твердой и газовой фаз может привести к оплавлению материала и к еще большему ухудшению условий контакта фаз. Поэтому выгоднее проводить процесс образования тетрафторида титана в газовой взвеси. В этих условиях разогрев частицы весьма незначителен, т.к. ее температура практически равна температуре газа [7].

В результате исследования процесса:

- изучены термодинамические особенности процесса фторирования рутилового концентрата элементарным фтором; показано, что с термодинамической точки зрения процесс не имеет ограничений;
- определены кинетические закономерности процесса фторирования диоксида титана элементарным фтором в температурном интервале 580...830 К, установлено, что реакция ограничена диффузионными факторами — энергия активации составляет 24600 Дж/моль;
- отмечено, что фторирование целесообразно проводить в газовой взвеси, когда температура частицы практически равна температуре газа и ее перегревания не происходит.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коровин С.С., Зимина Г.В., Резник А.М. Редкие и рассеянные элементы. Химия и технология. Кн. 2: – М.: МИСИС, 1996. – 382 с.
2. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов. – М.: Металлургия, 1991. – 431 с.
3. Карелин В.А., Карелин А.И. Фторидная технология переработки концентратов редких металлов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 184 с.
4. Синярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Г.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. – М.: Наука, 1986. – 261 с.
5. Щербаков В.И., Зуев В.А., Парфенов А.В. Кинетика и механизм фторирования соединений урана, плутония и нептуния фтором и галогенфторидами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 127 с.
6. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов. – М.: Химия, 1969. – 622 с.
7. Копырин А.А., Карелин А.И., Карелин В.А. Технология переработки ядерного топлива и его радиохимическая переработка. – М.: Атомэнергиздат, 2006. – 561 с.

УДК 546.824-31,661.878

## ФТОРОАММОНИЙНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ДИОКСИДА ТИТАНА

А.Н. Дьяченко

Томский политехнический университет  
E-mail: diachenko@phtd.tpu.ru

*Исследован новый метод получения диоксида титана из ильменита. Сущность метода заключается в разложении ильменита с помощью фторида аммония с последующим сублимационным отделением тетрафторида титана и его гидролизом до диоксида титана. Предложена аппаратурная схема технологического участка.*

Важнейший продукт титановой промышленности — диоксид титана, на который перерабатывается большая часть титанового сырья. Главный потребитель диоксида титана — лакокрасочная промышленность. К пигментному  $\text{TiO}_2$  предъявляются высокие требования по дисперсности и содержанию примесей железа, хрома меди, марганца, которые уже при содержании 0,01 % сообщают белому диоксиду титана различную окраску.

В настоящее время в промышленности применяется серноокислотный метод разложения ильменита [1]. Метод сложен, требует многих операций; главные из них: вскрытие концентрата, очистка сульфатных растворов, гидролиз растворов, прокаливание гидроксида до диоксида. В результате получается диоксид титана, требующий дальнейшей очистки от примесей.

В качестве альтернативной технологии переработки ильменита рассмотрен фтороаммонийный способ получения диоксида титана. Известно, что ильменит реагирует с фторидами аммония с образованием нестехиометрических соединений фторотитаната и фтороферрата аммония [2].

Фтороаммонийный метод позволяет в одну стадию выделить из ильменита тетрафторид титана и перевести его в форму диоксида титана. Метод сочетает в себе операции по разложению ильменита с одновременной очисткой от примесей хрома и тория. Метод не требует использования агрессивных реагентов и не приводит к образованию жидких или каких-либо других отходов. Предлагаемый способ позволяет получать как рутильную, так и анатазную форму диоксида титана.

Экспериментальная часть работы проводилась на ильменитовом концентрате Туганского горно-обогатительного комбината «Ильменит» [3]. Представленная проба ильменитового концентрата, кроме большого количества лейкоксена, содержала примеси хрома — до 1,5 % и фосфатов — до 0,1 %. Наличие этих примесей характерно для большинства ильменитовых концентратов и значительно затрудняет использование диоксида титана, полученного по классической технологии, в качестве пигмента. Одним из преимуществ предлагаемой технологии является независимость состава конечного титанового продукта от качества исходного ильменита.

Сущность предлагаемого метода заключается в разложении ильменита на дифторид железа и тетрафторид титана в расплаве фторида аммония.

Расплав фторида аммония является одним из лучших фторирующих агентов, при этом температура расплава всего 140 °С. В тоже время твердый фторид аммония при 20 °С является достаточно инертным кристаллическим порошком и, в отличие от фтора и фтороводорода, не представляет существенной экологической опасности. Важным, с точки зрения экономики процесса, является возможность полной регенерации фторида аммония и возврата его в цикл, что практически исключает затраты на этот реагент [4]. В настоящее время опубликованы работы по изучению процесса разложения фторидом аммония цирконовых [5, 6] и кварц-топазовых руд [7].

Технологически задача решается тем, что смешивают ильменит и фторид аммония в стехиометрической пропорции 1:1 и смесь нагревают до 300 °С.